

Optimasi pH Kombinasi Ekstrak Bunga Telang (*Clitoria ternatea*) dan Daun Pisang Kering (*Musa acuminata*) sebagai Natural Dye Sensitizer pada Rangkaian DSSC (Dye Sensitized Solar Cell)

Optimization of pH Combination of Telang Flower (*Clitoria ternatea*) and Dry Banana Leaf (*Musa acuminata*) Extract as Natural Dye Sensitizer in DSSC (Dye Sensitized Solar Cell) Series

Amanatur Roviqoh, Nita Kusumawati*

Jurusan Kimia, Universitas Negeri Surabaya, Jl. Ketintang Wiyata No. 62, Indonesia

*corresponding author: nitakusumawati@unesa.ac.id

Abstrak. Penelitian ini mengenai pemanfaatan ekstrak Bunga Telang (*Clitoria ternatea*) dan Daun Pisang kering (*Musa acuminata*) sebagai *natural dye sensitizer* pada DSSC (Dye Sensitized Solar Cell). Kombinasi kedua ekstrak pewarna diharapkan mampu memperluas daerah serapan cahaya sehingga mampu meningkatkan kinerja rangkaian DSSC. Kombinasi ekstrak Bunga Telang dan Daun Pisang kering diperoleh melalui proses maserasi dengan perbandingan komposisi antara Bunga Telang dan Daun Pisang kering adalah 1:1, 1:3, 3:1. Karakterisasi larutan pewarna dilakukan dengan analisis UV-Vis dan *cyclic voltammetry* dan diperoleh hasil terbaik pada larutan pewarna perbandingan 1:3 dengan energi *bandgap* 0,28462 eV. Komposisi pewarna terbaik diaplikasikan pada rangkaian DSSC dengan variasi pH 2, pH 7, dan pH 12 kemudian dilakukan pengukuran tegangan dan arus menggunakan multimeter sehingga diperoleh nilai V_{OC} 387 mV dan J_{SC} $2,6 \times 10^{-3}$ mA.cm⁻² pada kondisi pH 2. Hasil penelitian menunjukkan perolehan efisiensi tertinggi terjadi pada pH 2 yaitu sebesar 2,88%.

Kata-kata kunci: Bunga Telang; Daun Pisang Kering; DSSC; pH; PVDF

Abstract. This research is about the use of extracts of telang flower (*Clitoria ternatea*) and dry banana leaf (*Musa acuminata*) as natural dye sensitizer in DSSC (Dye Sensitized Solar Cell). The combination of the two dye extracts is expected to expand the light absorption area to improve the performance of the DSSC circuit. The combination of telang flower and dry banana leaf extract was obtained through the maceration process with the ratio between telang flower and dry banana leaf 1:1, 1:3, and 3:1. The characterization of the dye solution was carried out by UV-Vis analysis and cyclic voltammetry and the best results were obtained at 1:3 ratio of dye solution with a bandgap energy of 0,28462 eV. The best dye composition was applied to the DSSC series with variation of pH 2, 7, and 12 then measured the voltage and current using a multimeter to obtain the value of V_{OC} 387 mV and J_{SC} $2,6 \times 10^{-3}$ mA.cm⁻² at pH 2. The results showed that the highest efficiency gain occurred at pH 2 which is equal to 2,88%.

Keywords: Telang flower; Dry Banana Leaf; DSSC; pH; PVDF

1. Pendahuluan

Di masa sekarang, pengembangan energi terbarukan sangat penting untuk dilakukan akibat banyaknya masalah lingkungan yang disebabkan oleh pembakaran bahan bakar fosil dan diperparah dengan sifatnya yang tidak terbarukan, sedangkan kebutuhan masyarakat terhadap bahan bakar fosil semakin meningkat. Di antara berbagai energi terbarukan, energi surya sangat menarik untuk dikembangkan karena bebas polusi, ekonomis, berkelanjutan serta ketersediaannya yang melimpah di alam. Sel surya merupakan salah satu bentuk pemanfaatan energi surya yang telah banyak dikembangkan hingga sekarang. *Dye Sensitized Solar Cell* (DSSC) merupakan sel surya golongan ketiga yang dikembangkan pertama kali oleh O'Regan dan Gratzel pada tahun

1991 [1]. DSSC menarik untuk dikembangkan karena biaya fabrikasinya yang rendah, teknik fabrikasi sederhana, dan kinerja tinggi di bawah kondisi cahaya yang tersebar serta tentunya ramah lingkungan [2-11]. Secara umum, DSSC terdiri dari tiga komponen kunci, yaitu (i) lapisan oksida logam semikonduktor, umumnya TiO_2 ; (ii) *sensitizer* yang melapisi oksida logam, bertugas sebagai pemanen cahaya dan injeksi elektron ke dalam TiO_2 ; (iii) elektrolit, bertugas untuk regenerasi *sensitizer* teroksidasi [2].

Dye atau pewarna merupakan komponen kunci dalam DSSC yaitu dalam proses pemanenan cahaya dan proses konversinya menjadi energi listrik [12-16]. Oleh karena itu efisiensi DSSC kebanyakan tergantung pada jenis pewarna yang digunakan sebagai *sensitizer*. Profil serapan yang luas dan kuat merupakan prasyarat untuk memanen foton sebanyak mungkin dari penyinaran matahari [17, 18]. Selain itu, dalam pemilihan pewarna perlu diperhatikan proses transfer muatan *dye*- TiO_2 dan pengikatan molekul pewarna pada TiO_2 . Umumnya pewarna yang digunakan adalah pewarna berbasis kompleks logam dan pewarna organik sintetis. Namun, pewarna tersebut memiliki dampak buruk bagi lingkungan. Oleh karena itu, dikembangkanlah pewarna alami yang memiliki sifat *nonallergenic*, tidak beracun, *biodegradable* dan penggunaannya yang aman [19]. Selain itu, pewarna alami dari tumbuhan dapat dengan mudah diekstraksi dari buah, sayur, dan daun dengan prosedur kimia yang sederhana.

Perbedaan jenis *natural dye* menunjukkan perbedaan efisiensi dalam konversi energi surya menjadi energi listrik tergantung pada sumber dan struktur kimia dari pigmen warna yang terkandung di dalamnya serta interaksi antara molekul pewarna dan fotoanoda/ TiO_2 [20]. Menurut Rajan dan Cindrella (2019), *natural dye* memiliki kinerja lebih baik daripada pewarna sintetis karena adanya asam organik dan alkohol yang berbeda yang dapat mencegah rekombinasi elektron dengan elektrolit dan agregasi pewarna, sehingga meningkatkan injeksi muatan di dalam sel [21]. Selain itu, *natural dye* memiliki koefisien penyerapan yang besar, efisiensi pemanenan cahaya yang tinggi, mudah didapat dan ketersediaannya banyak di alam, biaya produksi rendah, teknik persiapan sederhana, serta ramah lingkungan [20]. Antosianin dan karotenoid merupakan salah dua dari beberapa pigmen dalam tanaman yang dapat dimanfaatkan sebagai *sensitizer* pada DSSC. Antosianin mengandung gugus aoksokrom seperti gugus karbonil (-COOH) dan hidroksil (-OH) yang memberikan kemampuan untuk menyerap cahaya dalam rentang sinar tampak dari sinar matahari [22]. Dalam penelitian ini digunakan ekstrak Bunga Telang (*Clitoria ternatea*) sebagai sumber antosianin. Bunga Telang (*Clitoria ternatea*) merupakan salah satu jenis tanaman yang tergolong dalam *family Fabaceae* yang banyak dimanfaatkan di bidang pertanian, kesehatan, pangan, dan lain sebagainya [23-24]. *Clitoria ternatea* diketahui mengandung pigmen antosianin yang menimbulkan warna biru keunguan pada hasil ekstraksi. Ekstrak Bunga Telang telah diketahui memiliki potensi sebagai *dye sensitizer* pada rangkaian DSSC. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pemanfaatan pigmen antosianin sebagai *dye sensitizer* pada rangkaian DSSC mampu menghasilkan efisiensi sebesar 0,069% [25] dan 0,29% [26] untuk ekstrak Bunga Telang serta 1,47% [27] untuk ekstrak *O sativa* L. dan *H sabdariffa* pada DSSC yang difabrikasi dengan TiO_2 sebagai lapisan semikonduktornya.

Selain itu, dalam penelitian ini juga digunakan ekstrak Daun Pisang kering (*Musa acuminata*) yang mengandung pigmen karotenoid di dalamnya. Daun Pisang kering (*Musa acuminata*) atau dikenal dengan pisang kering, sangat minim pemanfaatannya dalam kehidupan sehari-hari. Karoten dilaporkan sebagai pigmen pemanen cahaya dan memiliki peran penting dalam fotosintesis, yaitu melengkapi klorofil melalui reaksi redoks. Selain itu, karoten terdiri dari delapan unit isoprenoid sehingga memiliki potensi besar sebagai pemanen energi dan *sensitizer* untuk DSSC [20]. Karotenoid mengandung gugus karboksil yang memungkinkan terjadinya ikatan dengan permukaan TiO_2 dikarenakan gugus karboksil pada ujung rantai senyawa dapat mengikat Ti dari TiO_2 [28]. Berdasarkan penelitian Supriyanto, Nurosyid, dan Ahliha (2018), pemanfaatan pigmen karotenoid menghasilkan efisiensi sebesar 0,03% (ekstrak buah tomat), 0,02% (ekstrak buah jeruk), dan 0,009% (ekstrak wortel) [29]. Hal ini juga sejalan dengan penelitian Hemalatha, dkk. (2012)

yang menggunakan pigmen karotenoid dari ekstrak bunga *Keirra japonica* sebagai *natural dye sensitizer* pada DSSC menghasilkan efisiensi sebesar 0,22% [30].

Besarnya potensi dari kedua pigmen warna tersebut diharapkan mampu memberikan efek sinergis apabila kedua ekstrak tersebut dicampurkan sehingga mampu menghasilkan efisiensi DSSC yang tinggi. Hal ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menggabungkan turunan klorofil dan karotenoid sebagai *dye sensitizer* pada DSSC mampu meningkatkan efisiensi DSSC menjadi 4,2% dari 2,6% efisiensi DSSC dengan *single dye sensitizer*, karotenoid [31]. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan optimasi komposisi kombinasi ekstrak antosianin Bunga Telang dan karotenoid Daun Pisang kering yang nantinya akan terpilih komposisi optimum yang nantinya akan dioptimasi pula pH yang paling sesuai dengan kedua pigmen tersebut.

Selain itu, dalam penelitian ini juga digunakan *solid electrolyte* berbasis membran PVDF untuk menjebak larutan elektrolit sehingga mampu mengurangi kebocoran dan penguapan larutan elektrolit sehingga mampu meningkatkan konduktivitas ionik [32-34].

2. Bahan dan Metode

2.1. Bahan

Bahan-bahan pembuatan *natural dye sensitizer* terdiri dari Bunga Telang (*Clitoria ternatea*), Daun Pisang kering (*Musa acuminata*), dan aquades sebagai pelarut. Iodin (99,8%, Sigma Aldrich), kalium iodida (99%, Merck) *Ethylene carbonate* (99% anhidrat, Sigma Aldrich), dan *propylene carbonate* (99,7% anhidrat, Sigma Aldrich), digunakan dalam pembuatan larutan elektrolit. Titanium (IV) oksida (ukuran partikel 21 nm, 99,5%, Sigma Aldrich), asam nitrat (99,9%, Sigma Aldrich), polietilen glikol-1000 (Merck), dan Tween-80 (PT. Brataco Chemica) digunakan dalam pembuatan pasta TiO₂. Selain itu, dalam penelitian ini juga digunakan *polyvinylidene fluoride* (PVDF) (Mw 534,000, Sigma Aldrich), DMAc (88%, Merck), dan aseton (99,5%, Sigma Aldrich) sebagai bahan pembuatan membran serta kaca *Fluorine Dope Tin Oxide* (FTO) (10 Ω, ketebalan 2,2 mm, ukuran 2,5 x 2,5 cm²) sebagai kaca konduktif pada rangkaian DSSC. Sementara itu, instrumen yang digunakan dalam penelitian ini meliputi *rotary evaporator* (Buchi R-300), *magnetic stirrer* (NESCO Lab MS-H280-Pro), spektrofotometri UV-Vis (Shimadzu UV-1700), voltametri siklik (Computrance Metrohm 797 VA), dan multimeter (Krisbow KW08-267).

2.2. Pembuatan Natural Dye Sensitizer

Natural dye sensitizer diperoleh dari proses ekstraksi Bunga Telang (*Clitoria ternatea*) dan Daun Pisang kering (*Musa acuminata*). Ekstraksi dilakukan dengan metode maserasi selama 30 menit dengan perbandingan zat terlarut dengan pelarut (aquades) 1:6, sedangkan perbandingan antara Bunga Telang dan Daun Pisang kering divariasikan menjadi 1:1, 1:3, dan 3:1. Selain itu, juga dilakukan pengkondisian pH 2, 7, dan 12. Hasil maserasi disaring menggunakan kertas saring dan dilanjutkan dengan proses evaporasi menggunakan *rotary evaporator*, sehingga diperoleh konsentrat *natural dye* yang kemudian disimpan pada suhu 20-25 °C dan siap diaplikasikan sebagai *natural dye sensitizer* pada rangkaian DSSC.

2.3. Pembuatan Larutan Elektrolit

0,092 g iodin, 0,06 g kalium iodida, 0,4 g *ethylene carbonate*, dan 0,4 g *propylene carbonate* dicampur menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 100 rpm selama 30 menit sehingga diperoleh larutan elektrolit.

2.4. Pembuatan Membran PVDF

Pembuatan membran PVDF dimulai dengan pembuatan larutan cetak PVDF 18% (b/v) dengan melarutkan PVDF dalam larutan DMAc dan aseton (6:4) menggunakan *magnetic stirrer* (720 rpm, 65 °C) selama 720 menit. Kemudian dicetak di atas kaca berukuran 14 x 14 cm² menggunakan metode *casting knife* pada suhu 30 °C dan dilanjutkan dengan proses

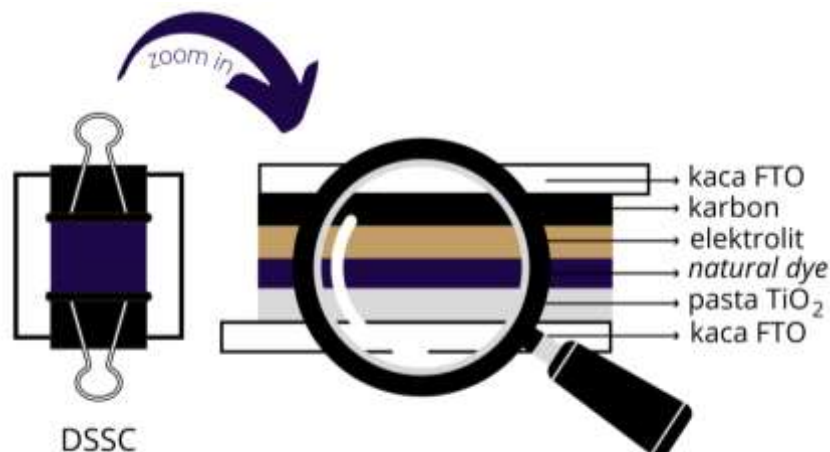
pra-imersi selama 5 menit. Hasil cetak diimersi dalam bak koagulasi yang berisi 1 L aquades pada suhu 30 °C selama 30 menit. Selanjutnya membran PVDF dicuci menggunakan 0,5 L aquades selama 1 menit dengan dua kali pengulangan. Membran PVDF dikeringkan pada suhu ruang selama 24 jam.

2.5. Pembuatan Pasta TiO_2

0,2 g titanium dioksida, 0,4 mL asam nitrat 0,1 M, 0,08 g polietilen glikol-1000, dan 0,05 mL Tween-80 dicampur menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 100 rpm selama 30 menit sehingga diperoleh pasta TiO_2

2.6. Pembuatan Rangkaian DSSC

Rangkaian DSSC tersusun dari dua kaca FTO (*Fluorine Doped Tin Oxide*) yang berperan sebagai anoda dan katoda. Proses perangkaian dimulai dengan melapiskan pasta TiO_2 pada kaca FTO anoda dengan metode *casting* dan selanjutnya dipanaskan pada suhu 450 °C selama 1 jam kemudian didiamkan pada suhu ruang selama 1 jam. Kaca FTO anoda- TiO_2 direndam dalam 10 mL konsentrasi *natural dye sensitizer* kombinasi ekstrak Bunga Telang dan Daun Pisang kering selama 24 jam. Membran PVDF yang telah direndam dalam 1 mL larutan elektrolit selama 1 jam, dilapiskan pada kaca FTO yang telah dilapisi karbon hasil pembakaran lilin. Kedua kaca FTO kemudian disusun menumpuk sehingga diperoleh struktur *sandwich* (Gambar 1).



Gambar 1. Struktur *sandwich* DSSC

2.7. Karakterisasi DSSC

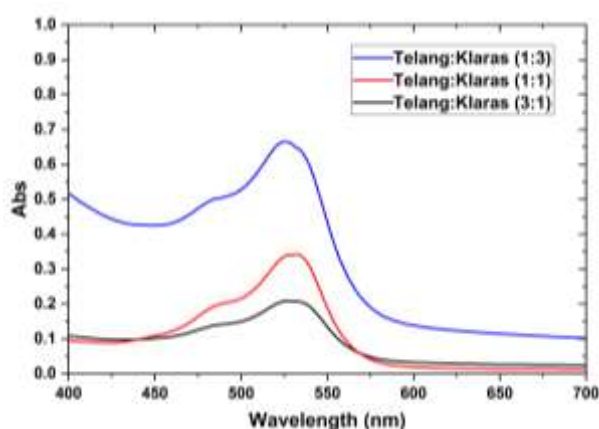
Karakterisasi DSSC dimulai dengan serapan panjang gelombang dari *natural dye* menggunakan spektrofotometri UV-Vis. Selanjutnya, analisis celah pita energi (*bandgap*) dari *natural dye* menggunakan voltametri siklik. Setelah itu dilakukan pengukuran menggunakan multimeter (resistensi 200 k Ω dan tegangan 200 mV) pada rangkaian DSSC sehingga diperoleh nilai *open-circuit photovoltage* (V_{OC}); *short-circuit current density* (J_{SC}); *fill factor* (FF); dan efisiensi (η).

3. Hasil Penelitian dan Pembahasan

3.1. Analisis Spektrofotometri UV-Vis

Analisis spektrofotometri UV-Vis dilakukan untuk mengetahui serapan panjang gelombang *natural dye* pada rentang sinar tampak. *Dye sensitizer* yang digunakan pada DSSC disyaratkan memiliki daerah serapan panjang gelombang pada rentang 400-800 nm [35]. Antosianin menyerap sinar tampak pada rentang 450-580 nm, sedangkan karotenoid menyerap cahaya pada panjang gelombang 380-520 nm pada spektrum warna biru dan hijau yang mengakibatkan warna yang

tampak adalah warna kuning, oranye, dan merah [30, 36]. Gambar 2 menunjukkan spektrum UV-Vis kombinasi ekstrak Bunga Telang dan Daun Pisang kering dengan berbagai variasi komposisi, yaitu 1:1, 1:3, dan 3:1. Spektrum UV-Vis yang diperoleh menunjukkan dua puncak serapan pada seluruh variasi komposisi pewarna, yaitu pada rentang 450-600 nm. Puncak serapan pigmen karotenoid dari variasi komposisi Bunga Telang:Daun Pisang kering 1:1, 1:3, dan 3:1 secara berurutan adalah 488 nm, 484 nm, dan 487 nm dengan absorbansi masing-masing adalah 0,203, 0,501, dan 0,141, sedangkan puncak serapan pigmen antosianin dari variasi komposisi Bunga Telang:Daun Pisang kering 1:1, 1:3, dan 3:1 secara berurutan adalah 531 nm, 525 nm, dan 527 nm dengan absorbansi masing-masing adalah 0,340, 0,660, dan 0,206. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa perbandingan komposisi Bunga Telang:Daun Pisang kering (1:3) memiliki potensi sebagai *natural dye sensitizer* pada DSSC lebih baik dibandingkan perbandingan komposisi yang lain dikarenakan nilai absorbansinya yang lebih tinggi sehingga mampu memanen lebih banyak foton dari penyinaran matahari [17-18].



Gambar 2. Spektrum UV-Vis pewarna kombinasi ekstrak Bunga Telang dan Daun Pisang kering

3.2. Analisis Voltametri Siklik

Selain melalui analisis UV-Vis, *natural dye* juga dianalisis melalui studi elektrokimia menggunakan voltametri siklik dengan tujuan untuk menentukan nilai HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*) dan LUMO (*Lowest Occupied Molecular Orbital*) pada pewarna. Tabel 1 menunjukkan hasil analisis menggunakan voltametri siklik dari berbagai variasi komposisi antara ekstrak Bunga Telang dan Daun Pisang kering. Dari tabel 1 dapat diketahui bahwa variasi komposisi mempengaruhi nilai HOMO, LUMO, dan energi *bandgap* dari pewarna. Secara berurutan nilai HOMO dari variasi komposisi ekstrak Bunga Telang dan Daun Pisang kering 1:1, 1:3, dan 3:1 adalah -4,29758 eV, -4,29748 eV, dan -4,29683, sedangkan untuk nilai LUMO secara berurutan adalah -3,98368 eV, -4,01286 eV, dan -3,85532 eV.

Nilai energi *bandgap* dari ketiga variasi komposisi ekstrak Bunga Telang dan Daun Pisang kering 1:1, 1:3, dan 3:1 secara berurutan adalah 0,31390 eV, 0,28462 eV, dan 0,44151 eV. Ketiga hasil tersebut menunjukkan bahwa ketiga perbandingan komposisi ekstrak Bunga Telang dan Daun Pisang kering memiliki nilai energi *bandgap* lebih rendah dibandingkan energi *bandgap* TiO₂, yaitu 3,2 eV [37]. Energi *bandgap* merupakan energi minimum yang diperlukan elektron untuk mengalami eksitasi dari pita valensi ke pita konduksi. Semakin kecil energi *bandgap* pada *dye sensitizer* maka semakin mudah elektron tereksitasi, sehingga semakin mudah elektron terinjeksi pada semikonduktor atau TiO₂ [38]. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa perbandingan komposisi ekstrak Bunga Telang dan Daun Pisang kering 1:3 merupakan perbandingan komposisi terbaik untuk dimanfaatkan sebagai *dye sensitizer* pada rangkaian DSSC, sehingga untuk studi *photovoltaic* rangkaian DSSC akan digunakan perbandingan komposisi tersebut.

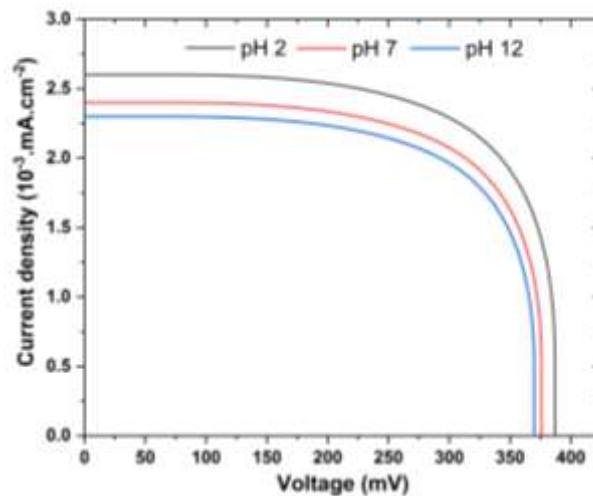
Tabel 1. Hasil analisis voltametri siklik dye kombinasi ekstrak Bunga Telang (*Clitoria ternatea*) dan Daun Pisang kering (*Musa acuminata*)

Pewarna	HOMO (eV)	LUMO (eV)	Bandgap (eV)
T-K (1:1)	-4,29683	-3,85532	0,44151
T-K (1:3)	-4,29748	-4,01286	0,28462
T-K (3:1)	-4,29758	-3,98368	0,31390

Keterangan: T: Bunga Telang; K: Daun Pisang Kering

3.3. Studi Photovoltaic Rangkaian DSSC

Peforma DSSC dapat dikarakterisasi menggunakan kurva *photo-current-voltage* (I-V). J_{SC} dan V_{OC} secara berurutan diukur menggunakan multimeter pada 0 V dan 0 A. Efisiensi konversi energi surya ke energi listrik secara keseluruhan juga dikenal sebagai efisiensi konversi daya dari sel surya. Tabel 2 menunjukkan hasil studi *photovoltaic* rangkain DSSC berbasis kombinasi pewarna Bunga Telang dan Daun Pisang kering 1:3 dengan variasi pH 2, 7, dan 12. Dipilihnya perbandingan kombinasi pewarna Bunga Telang dan Daun Pisang kering 1:3 dikarenakan energi *bandgap* yang dihasilkan paling rendah dibandingkan perbandingan komposisi yang lain. Pewarna dengan energi *bandgap* rendah memungkinkan terjadinya *red-shifted* pada spektrum serapan dan menghasilkan lebih banyak elektron dan dengan demikian meningkatkan nilai *open-circuit photo voltage* (V_{OC}) dan *short-circuit current density* (J_{SC}). Oleh karena itu, rendahnya energi *bandgap* menyebabkan peningkatan *photoelectric conversion efficiency* (PCE) pada DSSC [39-41]. Selain itu, pembangkitan J_{SC} dari sel fabrikasi tergantung pada jumlah zat warna yang teradsorpsi pada permukaan TiO_2 , struktur pewarna, efisiensi pemanenan cahaya dan kemampuan injeksi elektron zat warna [42]. Lebih banyak adsorpsi molekul pewarna pada permukaan TiO_2 menghasilkan lebih banyak foton dari sinar matahari yang pada gilirannya mengarah pada injeksi elektron yang cepat.



Gambar 3. Kurva I-V rangkaian DSSC berbasis kombinasi ekstrak Bunga Telang dan Daun Pisang kering dengan berbagai variasi pH

Tabel 2. Hasil studi *photovoltaic* rangkaian DSSC berbasis kombinasi ekstrak Bunga Telang dan Daun Pisang kering pada berbagai variasi pH

pH	J_{SC} (mA.cm^{-2})	V_{OC} (mV)	FF (%)	Efisiensi (%)
2	$2,6 \times 10^{-3}$	387	2,86	2,88
7	$2,4 \times 10^{-3}$	376	2,82	2,54
12	$2,3 \times 10^{-3}$	370	2,81	2,39

Tabel 2 menunjukkan hasil studi *photovoltaic* rangkaian DSSC berbasis kombinasi pewarna ekstrak Bunga Telang dan Daun Pisang kering pada berbagai variasi pH, yaitu pH 2, 7, dan 12.

Hasil yang diperoleh menunjukkan nilai J_{SC} tertinggi adalah pada pH 2 > pH 7 > pH 12 dengan nilai $2,6 \times 10^{-3} \text{ mA.cm}^{-2}$, $2,4 \times 10^{-3} \text{ mA.cm}^{-2}$, dan $2,3 \times 10^{-3} \text{ mA.cm}^{-2}$. Sedangkan nilai V_{OC} tertinggi diperoleh pada pewarna dengan kondisi pH 2 > pH 7 > pH 12, yaitu 387 mV, 376 mV, 370 mV. Pada pH 2 diperoleh nilai FF dan efisiensi tertinggi yaitu 2,86% dan 2,88%, diikuti pH 7, 2,82% dan 2,54% serta pH 12, 2,81% dan 2,39%. Dari nilai J_{SC} , V_{OC} , FF, dan efisiensi dapat diketahui bahwa kondisi terbaik untuk *natural dye sensitizer* kombinasi ekstrak Bunga Telang dan Daun Pisang kering adalah pada pH 2. Hal ini sesuai dengan penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa pigmen antosianin lebih stabil dalam pH asam serta ketika pH meningkat, pada pH 10 dan 12 nilai J_{SC} menurun secara signifikan, yang kemungkinan disebabkan oleh menurunnya kemampuan pigmen antosianin berikatan dengan permukaan TiO_2 [43-47]. Namun, berdasarkan penelitian terdahulu, diketahui bahwa pigmen karotenoid bersifat antara asam hingga basa (pH 2-8) dan cenderung stabil pada kondisi pH netral hingga basa sehingga pada rentang pH inilah dapat diperoleh hasil maksimum. Berdasarkan penelitian terdahulu mengenai pengaruh pH karotenoid dari Buah Tomat terhadap kinerja DSSC, diperoleh hasil bahwa pada pH 9,6 dihasilkan nilai tegangan dan arus tertinggi serta diperoleh nilai efisiensi tertinggi yaitu sebesar $38,19 \times 10^{-6}\%$ [48]. Dari penjelasan tersebut dapat dikaitkan dengan hasil analisis UV-Vis yang menunjukkan bahwa lebih dominan pigmen antosianin dalam hasil ekstraksi kombinasi Bunga Telang dan Daun Pisang kering sehingga pada pH 2 diperoleh nilai efisiensi tertinggi dikarenakan lebih dominannya pigmen antosianin pada campuran pewarna yang digunakan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kombinasi ekstrak Bunga Telang (*Clitoria ternatea*) dan Daun Pisang kering (*Musa acuminata*) berpotensi sebagai *natural dye sensitizer* pada rangkaian DSSC ditandai dengan hasil karakterisasi pewarna menggunakan UV-Vis yang menunjukkan adanya serapan cahaya pada rentang panjang gelombang 400-700 nm serta memiliki energi *bandgap* yang lebih rendah dibandingkan energi *bandgap* TiO_2 , yaitu 3,2 eV. Perbandingan komposisi terbaik adalah 1:3 (Bunga Telang:Daun Pisang kering). Selain itu, berdasarkan studi *photovoltaic* diperoleh hasil terbaik pada kondisi pH 2 (asam) yang dibuktikan dengan nilai V_{OC} , J_{SC} , FF, dan efisiensi (η) tertinggi dibandingkan kondisi yang lain, yaitu $2,6 \times 10^{-3} \text{ mA.cm}^{-2}$, 387 mV, 2,86%, dan 2,88%.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Tim Riset Merah Putih Laboratorium Kimia Analitik Jurusan Kimia FMIPA Unesa dan seluruh pihak yang telah memfasilitasi, membantu, dan mendukung tuntasnya pelaksanaan dan publikasi penelitian ini dalam Prosiding Seminar Nasional Kimia (SNK) Tahun 2022.

Daftar Pustaka

- [1] D. M. Almenningen, H. E. Hansen, A. F. Buene, B. H. Hoff dan O. R. Gautun, "Effect of seven different terthiophene π -spacers on dye performance in dye-sensitized solar cells," *Dyes and Pigments*, vol. 207, 2022.
- [2] A. Hagfeldt, G. Boschloo, L. Sun, L. Kloo dan H. Pettersson, "Dye-sensitized solar cells," *Chemical Reviews*, vol. 110, pp. 6595-6663, 2010.
- [3] P. Wang, L. Yang, H. Wu, Y. Cao, J. Zhang, N. Xu, S. Chen, J. Decoppet, S. M. Zakeeruddin dan M. Gratzel, "Stable and efficient organic dye-sensitized solar cell based on ionic liquid electrolyte," *Joule*, vol. 2, pp. 2145-2153, 2018.

- [4] S. Zhang, X. Yang, Y. Numata dan L. Han, "Highly efficient dye-sensitized solar cells: progress and future challenges," *Energy & Environmental Science*, vol. 6, pp. 1443-1464, 2013.
- [5] M. Kokkonen, P. Talebi, J. Zhou, S. Asgari, S. A. Soomro, F. Elsehrawy, J. Halme, S. Ahmad, A. Hagfeldt dan S. G. Hashmi, "Advanced research trends in dye-sensitized solar cells," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 9, pp. 10527-10545, 2021.
- [6] H. Cheng, M. Wang, Y. Li, G. Zhao dan Z. Wang, "An imidazolium iodide salt as a bifunctional co-adsorbent for quasi-solid-state dye-sensitized solar cells: improvements of electron lifetime and charge collection efficiency," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 7, pp. 2702-2708, 2019.
- [7] L. Zhang, X. Yang, W. Wang, G. G. Gurzadyan, J. Li, X. Li, J. An, Z. Yu, H. Wang, B. Cai, A. Hagfeldt dan L. Sun, "13.6% efficient organic dye-sensitized solar cells by minimizing energy losses of the excited state," *ACS Energy Letter.*, vol. 4, pp. 943-951, 2019.
- [8] M. Freitag, J. Teuscher, Y. Saygili, X. Zhang, F. Giordano, P. Liska, J. Hua, S. M. Zakeeruddin, J. Moser, M. Gratzel dan A. Hagfeldt, "Dye-sensitized solar cells for efficient power generation under ambient lighting," *Nature Photonics*, vol. 11, pp. 372-378, 2017.
- [9] C. Wu, G. Li, X. Cao, B. Lei dan X. Gao, "Carbon nitride transparent counter electrode prepared by magnetron sputtering for a dye-sensitized solar cell," *Green Energy & Environment*, vol. 2, pp. 302-309, 2017.
- [10] S. Ertenela, K. Ocakoglu, A. Tarnowska, A. Vakuliuk dan D. T. Gryko, "Performance of zinc chlorophyll based molecules for dye sensitized solar cell," *Dyes and Pigments*, vol. 114, pp. 129-137, 2015.
- [11] M. Jalali, R. S. Moakhar, A. Kushwaha, G. K. L. Goh, N. Riahnoori dan S. K. Sadrezaad, "Enhanced dye loading-light harvesting TiO₂ photoanode with screen printed nanorod-nanoparticles assembly for highly efficient solar cell," *Electrochimica Acta*, vol. 169, pp. 295-401, 2015.
- [12] Q. Huailme, V. M. Mwalukuku, D. Joly, J. Liotier, Y. Kervella, P. Maldivi, S. Narbey, F. Oswald, A. J. Riquelme, J. A. Anta dan R. Demadrille, "Photochromic dye-sensitized solar cells with light-driven adjustable optical transmission and power conversion efficiency," *Nature Energy*, vol. 5, pp. 468-477, 2020.
- [13] M. Liang dan J. Chen, "Arylamine organic dyes for dye-sensitized solar cells," *Chemical Society Reviews*, vol. 42, pp. 3453-3488, 2013.
- [14] J. Wang, S. Liu, Z. Chai, K. Chang, M. Fang, M. Han, Y. Wang, S. Li, H. Han, Q. Li dan Z. Li, "Significantly improved performance of dye-sensitized solar cells by optimizing organic dyes with pyrrole as the isolation spacer and utilizing alkyl chain engineering," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 6, pp. 22256-22265, 2018.
- [15] C. Liao, K. Zeng, H. Wu, Q. Zeng, H. Tang, L. Wang, H. Meier, Y. Xie dan D. Cao, "Conjugating pillarene dye in dye-sensitized solar cells," *Cell Reports Physical Science*, vol. 2, pp. 100326, 2021.
- [16] C. Li, Y. Kuo, C. P. Kumar, P. Huang dan J. T. Lin, "Tetraphenylethylene tethered phenothiazine-based double-anchored sensitizers for high performance dye-sensitized solar cells," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 7, pp. 23225-23233, 2019.
- [17] F. Grifoni, M. Bonomo, W. Naim, N. Barbero, T. Alnasser, I. Dzeba, M. Giordano, A. Tsaturyan, M. Urbani, T. Torres, C. Barolo dan F. Sauvage, "Toward sustainable, colorless, and transparent photovoltaics: state of the art and perspectives for the development of selective near-infrared dye-sensitized solar cells," *Advanced Energy Materials*, vol. 11, p. 2101598, 2021.
- [18] Y. Kurumisawa, T. Higashino, S. Nimura, Y. Tsuji, H. Iiyama dan H. Imahori, "Renaissance of fused porphyrins: substitute methylene-bridged thiophene-fused strategy for high-performance dye-sensitized solar cells," *Journal of the American Chemical Society*, vol. 141, pp. 9910-9919, 2019.
- [19] M. Mirjalili dan L. Karimi, "Extraction and characterization of natural dye from green walnut shells and its use in dyeing polyamide: Focus on antibacterial properties," *Journal of Chemistry*, vol. 2013, 2013.
- [20] A. Omar, M. S. Ali dan N. A. Rahim, "Electron transport properties analysis of titanium dioxide dye-sensitized solar cells (TiO₂-DSSCs) based natural dyes using electrochemical impedance spectroscopy concept: A review," *Solar Energy*, vol. 207, pp. 1088-1121, 2020.
- [21] A. K. Rajan dan L. Cindrella, "Studies on new natural dye sensitizers from *Indigofera tinctoria* in dye-sensitized solar cells," *Optical Materials*, vol. 88, pp. 39-47, 2019.
- [22] G. T. Tractz, A. Viomar, B. V. Dias, C. A. D. Lima, E. P. Banczek, M. T. D. Cunha dan P. R. P. Rodrigues, "Recombination study of dye sensitized solar cells with natural extracts," *Journal of the Brazilian Chemical*

- Society*, vol. 30, pp. 371-378, 2019.
- [23] G. K. Oguis, E. K. Gilding, M. A. Jackson dan D. J. Craik, "Butterfly pea (*Clitoria ternatea*), a cyclotide-bearing plant with applications in agriculture and medicine.," *Frontiers in Plant Science*, vol. 10, 2019.
- [24] T. N. Pham, D. C. Nguyen, T. D. Lam, T. P. Van, X. T. Le, D. V. V. Nguyen, H. V. Quang, T. D. Nguyen dan L. G. Bach, "Extraction of anthocyanins from Butterfly pea (*Clitoria ternatea* L. flowers) in Southern Vietnam: Respons surface modeling for optimization of the operation conditions," dalam *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 542, pp. 012032, 2019.
- [25] A. Hayat, A. E. E. Putra, N. Amaliyah dan S. S. Pandey, "Clitoria ternatea flower as natural dyes for dye-sensitized solar cells," dalam *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 619, pp. 012049, 2019.
- [26] T. G. V. Prabhu, J. Chandrasekaran, D. Thangaraju, P. Vivek dan S. Gopi, "Fabrication and performance analysis of set standard natural dye-sensitized solar cell (N-DSSC) using extracted *Terminalia kattapa* (Red), *Azadirachia indica* (Green), and *Clitoria ternatea* (Blue) dyes with virgin Degussa p25 photo-anode," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 33, pp. 17331-17342, 2022.
- [27] N. Patni, S. G. Pillai, and P. Sharma, "Effect of using betalain, anthocyanin and chlorophyll dyes together as a sensitizer on enhancing the efficiency of dye-sensitized solar cell," *International Journal of Energy Research*, vol. 44, no. 13, pp. 10846-10859, 2020.
- [28] S. Ananth, P. Vivek, T. Solaiyammal dan P. Murugakoothan, "Pre dye treated dioxide nano particles sensitized by natural dye extract of *Pterocarpus marsupium* for dye sesitized solar cells," *Optik*, vol. 126, no. 9, pp. 1027-1031, 2015.
- [29] A. Supriyanto, F. Nurosyid dan A. H. Ahliha, "Carotenoid pigment as sensitizers for applications of dye-sensitized solar cell (DSSC)," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 432, 2018.
- [30] K. V. Hemalatha, S. N. Karthick, R. C. Justin, N. Y. Hong, S. K. Kim dan H. J. Kim, "Performance of *Kerria japonica* and *Rosa chinensis* flower dyes as sensitizers for dye-sensitized solar cells," *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, vol. 96, pp. 305-309, 2012.
- [31] H. A. Maddah, V. Berry dan S. K. Behura, "Biomolecular photosensitizers for dye-sensitized solar cells: Recent developments and critical insights," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 121, 2020.
- [32] S. J. Lukas, D. Marius, A. Sonia, S. Michelle, B. Bennet dan G. Timo, "Long-term stability improvement of non-toxic dye-sensitized solar cells via poly(ethylene oxide) gel electrolytes for future textile-based solar cells," *Polymers*, vol. 12, no. 12, p. 3035, 2020.
- [33] R. Karuppanan, S. Anandan dan J. Kadhasamy, "Polymer electrolytes in dye sensitized solar cells," *Material Focus*, vol. 4, no. 4, pp. 262-271, 2015.
- [34] W. Yixin, L. Yu, W. Yang, L. Qian, C. Qingguo dan C. Minghua, "Advances and prospects of PVDF based polymer electrolytes," *Journal of Energy Chemistry*, vol. 64, pp. 62-68, 2022.
- [35] M. Choi, Y. Noh, K. Kim dan O. Song, "Properties of dye sensitized solar cells with porous TiO₂ layers using polymethyl-methacrylate nano beads," *Korean Journal of Materials Research*, vol. 26, no. 4, 2016.
- [36] A. H. Ahliha, F. Nurosyid, A. Supriyanto dan T. Kusumaningsih, "Optical properties of anthocyanin dyes on TiO₂ as photosensitizers for application of dye-sensitized solar cell (DSSC)," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 333, 2018.
- [37] R. D. Angel, J. C. Duran-Alvarez dan R. Zanella, "TiO₂-low band gap semiconductor heterostructures for water treatment using sunlight-driven photocatalysis," in *Titanium Dioxide - Material for a Sustainable Environment*, D. Yang, Ed., 2018.
- [38] U. I. Ndeze, A. Joseph, C. E. Sabastine dan F. W. John, "Comparative performance of nature-based dyes extracted from Baobab and Shea leaves photo-sensitizers for dye-sensitized solar cells (DSSCs)," *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, vol. 4, pp. 100-105, 2021.
- [39] Y. Li, Y. Li, P. Song, F. Ma, J. Liang dan M. Sun, "Screening and design of high-performance indoline-based dyes for DSSCs," *RSC Advances*, vol. 7, no. 33, pp. 20520-20536, 2017.
- [40] N. Mohammadi, P. J. Mahon dan F. Wang, "Toward rational design of organic dye sensitized solar cells (DSSCs): an application to the TA-St-CA dye," *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, vol. 40, pp. 64-71, 2013.
- [41] W. Fan, D. Tan, Q. Zhang dan H. Wang, "Computational study of diketopyrrolopyrrole-based organic dyes

- for dye sensitized solar cell applications,” *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, vol. 57, pp. 62-69, 2015.
- [42] R. Jose, V. Thavasi dan S. Ramakrishna, “Metal oxides for dye-sensitized solar cells,” *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 92, pp. 289-301, 2009.
- [43] A. Okello, B. O. Owuor, J. Namukobe, D. Okello dan J. Mwabora, “Influence of the pH of anthocyanins on the efficiency of dye sensitized solar cells,” *Heliyon*, vol. 8, 2022.
- [44] M. H. Buraidah, L. P. Teo, S. N. F. Yusuf, M. M. Noor, M. Z. Kufian, M. A. Careem, S. R. Majid, R. M. Taha dan A. K. Arof, “TiO₂/Chitosan-NH₄I(+I₂)-BMII-based dye-sensitized solar cells with anthocyanin dyes extracted from black rice dan red cabbage,” *International Journal of Photoenergy*, vol. 2011, pp. 1-11, 2011.
- [45] B. Aishah, M. Nursabrina, A. Noriham, A. R. Norizzah dan M. S. H., “Anthocyanins from Hibiscus subdariffa, Melastoma malabathricum and Ipomoea batatas and its color properties,” *International Food Research Journal*, vol. 20, no. 2, pp. 827-834, 2013.
- [46] R. Rakkimuthu, S. Palmurugan dan A. Shanmugapriya, “Effect of temperature, light, pH on the stability of anthocyanin pigments in cocculus hirsutus fruit,” *International Journal of Multidisciplinary Research and Modern Education*, vol. 2, no. 2, pp. 91-96, 2016.
- [47] S. Oancea dan O. Draghici, “pH and thermal stability of anthocyanin-based optimised extracts of Romanian red onion cultivars,” *Czech Journal of Food Sciences*, vol. 31, pp. 283-291, 2013.
- [48] M. L. F. Purba, “Pengaruh variasi pH dye karotenoid dari buah tomat terhadap daya keluaran DSSC,” thesis, Universitas Brawijaya, Malang, 2019.